

基于模型预测控制的电动汽车电液复合制动力分配策略研究

张韦阳, 郑竹安*, 秦亚宁, 张 坤

盐城工学院机械工程学院, 江苏 盐城

收稿日期: 2023年11月17日; 录用日期: 2023年12月31日; 发布日期: 2024年1月9日

摘 要

为了提高纯电动汽车制动过程中的能量回收效率和制动的稳定性, 通过对电动汽车复合制动系统结构及工作原理进行分析, 设计了基于模糊算法的路面识别器, 跟踪路面峰值附着系数, 以获得制动器的最大制动力。提出了一种基于模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)跟踪最佳滑移率的制动力分配的策略方法。从而达到能量回收效率的最大化, 并利用AVL/CRUISE和MATLAB/Simulink仿真环境开展联合仿真分析。结果表明: 所提出的控制策略与优化前的控制策略对比, 保证了车辆制动稳定性的同时, 制动距离更小, 制动时间更短, 电机制动力矩更大, 电池荷电状态(State of Charge, SOC)值下降地更为缓慢, 在一个FTP、New European Driving Cycle (NEDC)循环工况下电池荷电状态值分别显著提高了0.66%、0.46%。

关键词

模型预测控制, 路面识别器, 能量回收

Research on Electro-Hydraulic Composite Braking Force Distribution Strategy of Electric Vehicle Based on Model Predictive Control

Weiyang Zhang, Zhu'an Zheng*, Yaning Qin, Kun Zhang

School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu

Received: Nov. 17th, 2023; accepted: Dec. 31st, 2023; published: Jan. 9th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 张韦阳, 郑竹安, 秦亚宁, 张坤. 基于模型预测控制的电动汽车电液复合制动力分配策略研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(1): 112-122. DOI: 10.12677/mos.2024.131012

Abstract

In order to improve the energy recovery efficiency and braking stability during the braking process of pure electric vehicles, a road recognition device based on a fuzzy algorithm was designed by analyzing the structure and working principle of the electric vehicle composite braking system to track the peak adhesion coefficient of the road surface and obtain the maximum braking force of the brake. A strategy method based on model predictive control (MPC) was proposed to track the optimal slip rate of brake force distribution. In this way, energy recovery efficiency is maximized and collaborative simulation analysis is conducted using AVL/CRUISE and MATLAB/Simulink simulation environments. The results show that compared with the control strategy before optimization, the proposed control strategy not only ensures the braking stability of the vehicle, but also has a smaller braking distance, shorter braking time, larger motor braking torque, and slower decrease in battery state of charge (SOC) value. Under FTP and new European driving cycle (NEDC) conditions, the battery charge state value significantly increased by 0.66% and 0.46%, respectively.

Keywords

Model Predictive Control, Road Identifier, Energy Recovery

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来随着能源危机的逐渐浮现,发展电动汽车已经成为了应对全球环境危机和能源紧张的重要手段。在国内外政策与能源调整的驱动下,电动汽车迎来了高速的发展期[1],但是电动汽车的续航里程严重影响了汽车的发展与推广程度[2]。因此,电动汽车研究领域的重点问题之一就是如何提高能量利用效率,使有限的能源被更多地利用在驱动汽车行驶上以提高续航里程。

汽车在正常行驶的过程中,汽车的制动能耗占汽车总能耗的20%左右,是汽车能量浪费的主要方式,为了减少此部分能量浪费而产生了再生制动技术[3]。再生制动即在制动过程中控制驱动电机使之以发电机模式工作,同时产生制动力矩作为汽车制动时的一部分制动力来源,从而将部分耗散的能量回收收到动力电池中供汽车继续使用,从而提高电动汽车的续航里程的一项技术[4]。虽然再生制动系统有着相当多的优点,但是电动汽车在制动时不能仅通过电机提供的制动力进行制动。因为在制动时电机可以提供的制动力非常有限,且易受到各种条件限制,在中高强度制动时,需要再生制动系统与传统摩擦制动系统协同工作,共同提供制动力才能够满足此工况下的制动力需求[5]。因此,需为电动汽车设计一种兼顾能量回收效率与制动安全性的摩擦电机复合制动力分配策略。所设计的分配策略可以用于纯电动汽车或燃料电池混合动力汽车等各类带有动力电池的电动汽车。提出了模型预测控制方法。提出改进的Burckhardt轮胎模型计算了最佳滑移率,使用模型预测控制对最佳滑移率进行跟踪,同时以控制量增量最小为优化目标设计了制动力矩分配方法,实现了车辆的快速、平稳制动,且制动过程中回收较多能量。分配策略设计完成后,分别使用MATLAB/Simulink与CRUISE建立复合制动力分配策略模型与电动汽车整车模型,并在新标欧洲测试循环(以下简称NEDC)工况和美国的一种认证工况(以下简称FTP)下进行联合仿真,以评估所设计分配策略的可行性、有效性及在本地化工况下的运行效果。

2. 复合制动分配策略的建立

2.1. 机电复合制动系统的结构

汽车机电复合制动系统主要由电机控制器、制动器、液压调节单元、电机、逆变器、电池、车轮等关键零部件组合而成。如图 1 所示。当汽车制动时，制动控制单元会收集制动踏板的位移情况以及轮速等信息。再由整车控制器根据汽车当前状态以及驾驶员的制动意图，结合控制策略分配前后轮制动力的大小，之后将所分配的制动力的大小分配给电机控制器与液压调节单元，由其控制各执行元件产生相应的制动。

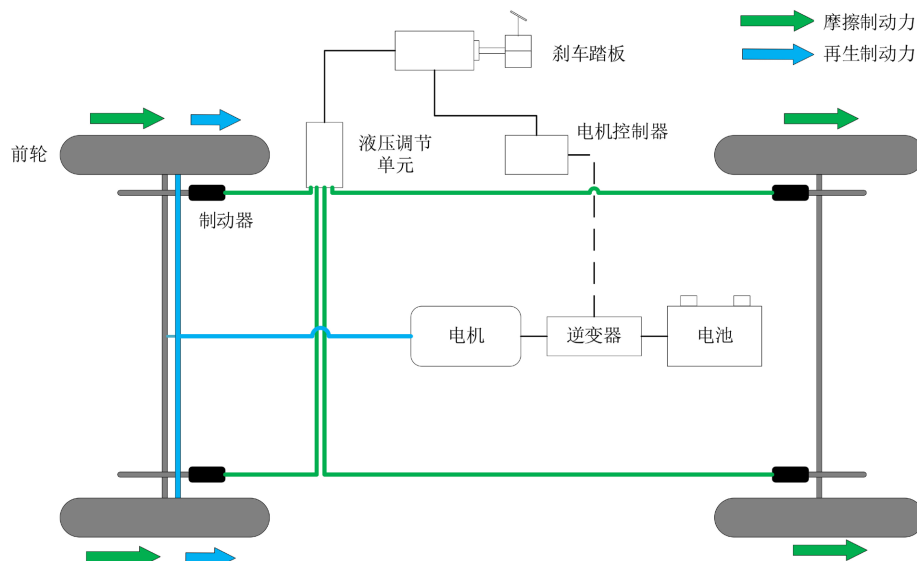


Figure 1. Structure diagram of electromechanical composite braking system
图 1. 机电复合制动系统结构图

2.2. 车辆动力学模型

本文以后轮驱动的新能源汽车作为研究对象，忽略车辆的侧向运动，只考虑汽车的纵向运动。汽车运动方程以及前、后轮运动公式分别为：

$$m\dot{v} = F_{xf} + F_{xr} \quad (1)$$

$$J\dot{\omega}_f = F_{xf}R - T_{bf} \quad (2)$$

$$\left(J + \frac{1}{2}J_{pt} \right) \dot{\omega}_r = F_{xr}R + T_d - T_{br} \quad (3)$$

式中， m 为汽车中心质量； v 为汽车车速； j 为车轮转动惯量； J_{pt} 为驱动轮动力总成所产生的转动惯量； F_{xf} 为前轮纵向力； F_{xr} 为后轮纵向力； R 为车轮半径； T_{bf} 为前轮制动力矩； T_{br} 为后轮制动力矩； T_d 为驱动力矩； ω_f 和 ω_r 分别为前、后轮的车轮转速。

车轮滑移率为：

$$S_i = \frac{v - \omega_i R}{v}, i = f, r \quad (4)$$

对其求导：

$$\dot{S} = \frac{\dot{v}}{v}(1 - S_i) - \frac{\dot{\omega}_i R}{v}, i = f, r \quad (5)$$

式中： S_f , S_r 分别为前、后轮的滑移率。

2.3. 关键零部件模型

(1) 轮胎模型。因为本文忽略汽车的侧向运动，所以轮胎模型只需要计算车轮纵向力即可，轮胎横向力与横摆暂不考虑，所以本文采用的轮胎模型为 Burckhardt 轮胎模型，此模型为经验模型，且精确度较高。在此基础上 Burckhardt 模型建立了滑移率与轮胎/路面摩擦系数在几种不同路面上的关系如表 1 所示[6]。

$$\mu(S) = C_1(1 - e^{-C_2 S}) - C_3 S \quad (6)$$

式中， C_1 、 C_2 、和 C_3 为路面因子，不同的路面因子取值表征不同的路面[7]。

Table 1. System resulting data of standard experiment
表 1. 标准试验系统结果数据

| 路面 | C_1 | C_2 | C_3 |
|--------|--------|--------|--------|
| 干沥青路面 | 1.2801 | 23.99 | 0.52 |
| 干混凝土路面 | 1.1973 | 25.16 | 0.5373 |
| 湿沥青路面 | 0.857 | 33.82 | 0.347 |
| 鹅卵石路面 | 0.4004 | 33.708 | 0.347 |
| 雪路面 | 0.1946 | 94.12 | 0.0646 |
| 冰路面 | 0.05 | 306.3 | 0 |

车轮的纵向利用附着系数：

$$\mu = \frac{F_{xb}}{F_z} \quad (7)$$

车轮垂直载荷为：

$$F_{zf} = \frac{mg}{2(l_f + l_r)} \left(l_r - \frac{h\dot{v}}{g} \right) \quad (8)$$

$$F_{zr} = \frac{mg}{2(l_f + l_r)} \left(l_f + \frac{h\dot{v}}{g} \right) \quad (9)$$

式中 μ ——为路面的摩擦系数；

F_{zf} , F_{zr} ——分别为前后轮的垂直载荷；

g ——重力加速度；

h ——汽车质心到路面距离；

l_f , l_r ——分别为汽车质心到前后轴距离。

(2) 电机模型。在复合制动时电机作为发电机使用，使用建模法得到的电机模型为：

$$P_r = T_m \omega_r \rho(T_m, \omega_r) \quad (10)$$

式中： P_r ——电机再生制动回收功率； T_m ——再生制动转矩； ω_r ——电机·转速； ρ ——电机效率。

(3) 电池模型。本文为了简化计算，使用的是内阻式模型为：

$$S(t) = S(0) - \frac{\int_0^t I_b(\tau) d\tau}{Q_c} \quad (11)$$

$$I_b = \frac{U_0 - \sqrt{P_r R_b}}{R_b} \tag{12}$$

式中： $S(t)$ ——电池实时电量； $S(0)$ ——初始电量； Q_c ——电池总容量； U_0 ——电池开路电压； R_b ——电池内阻； I_b ——电池电流。

3. 最佳滑移率的确定

路面识别器模型

汽车在紧急制动时，如果路面附着系数发生变化，那么汽车的制动效率也会相应的发生变化，针对路面变化状况设计了一种路面识别器，其可以根据路面对车轮的反馈得出路面峰值附着系数，路面识别器总体结构如图 2 所示。

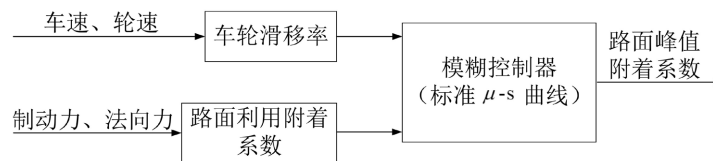


Figure 2. Overall structure of pavement recognizer
图 2. 路面识别器总体结构

当确定了路面附着系数之后，同时也确定了其对应的滑移率与摩擦系数的曲线，如图 3 所示。

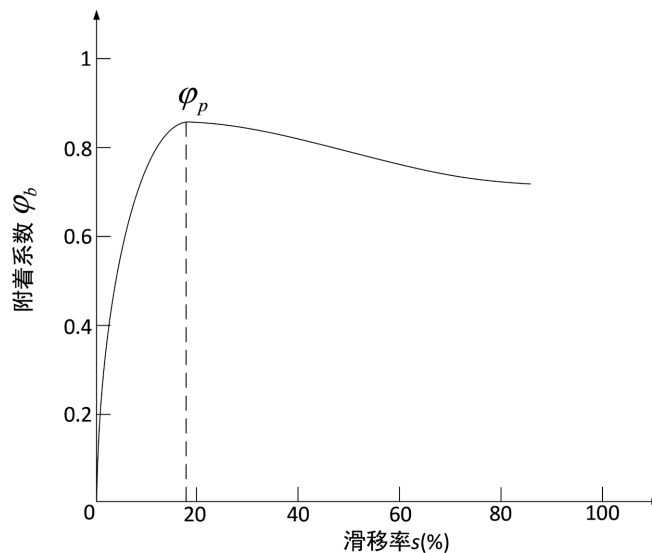


Figure 3. Schematic diagram of optimal slip rate
图 3. 最佳滑移率示意图

图中 $0 \leq S \leq S_d$ 区域，附着系数和滑移率均增大，但是滑移率相对较小，不会发生车轮抱死，称之为稳定区域；在 $S_d \leq S \leq 1$ 区域，路面附着系数随滑移率增大而逐渐减小，可能发生车轮抱死，称之为不稳定区域。制动过程中，车轮滑移率逐渐增大，首先进入稳定区域；随着制动过程的进行，可能越过最佳滑移率 S_d 而进入非稳定区域。对前后轮制动力矩的分配策略是，通过对前后轮力矩的合理分配，使车轮滑移率跟踪最佳滑移率，从而能够得到最大附着系数，使车辆制动力矩得到充分应用，同时防止车轮抱死。

4. 复合制动控制流程及前后轮制动力矩分配

4.1. 复合制动力矩分配流程

本文设计的模型预测的机电复合控制策略的主要分配流程如图 4 所示：当汽车在制动时根据路面识别器识别出当前路面的峰值路面附着系数 φ 从而得到当前汽车制动所需的最大制动力，先根据制动强度来分配汽车的前后轮制动力得出前轮制动力 T_{bf} 和后轮制动力 T_{br} ；通过模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)对最佳滑移率进行控制，得出复合制动分配策略，将后轮制动的电机转矩和机械转矩进行分配，进而计算得出后轮机械制动力 T_{Hr} 、后轮电机制动力 T_{Mr} 以及前轮机械制动力 T_{rf} 。当复合制动强度不能满足汽车制动强度时，不采用电机制动，只进行机械制动，保证汽车制动时的安全稳定性。

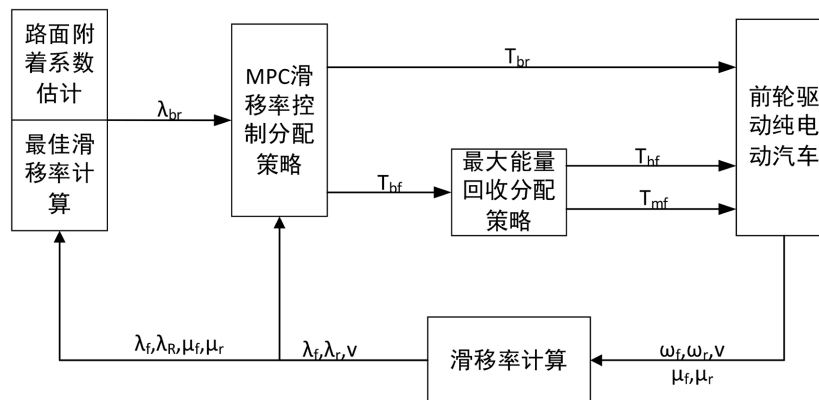


Figure 4. Electromechanical composite brake control flow
图 4. 机电复合制动控制流程

4.2. 前后轮制动力矩分配

使用模型预测控制分配前后轴制动力矩。模型预测控制包括模型预测、滚动优化、反馈控制等三个步骤[8] [9]。

联立式(1)~(4)，并代入式(5)，以前后轴制动力矩 $U = [T_{bf}, T_{br}]^T$ 作为系统的输入，以前后轮滑移率为 $x = [S_f, S_r]^T$ 状态变量，同样也以前后轮滑移率 $y = [S_f, S_r]^T$ 为输出变量，得到状态空间方程为：

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Cd(t) \quad (13)$$

$$y(t) = Ex(t) \quad (14)$$

式中 A 为状态转移矩阵， B 为控制矩阵， C 为干扰矩阵， E 为输出举证， $d(t)$ 干扰项矩阵，是一个常数矩阵。

定义 P 为预测时域， M 为控制时域，且 $P \geq M \geq 1$ 。定义滑移率的理想值 $r(k) = S_d$ 。控制问题的优化目标函数为[10]：

$$\min = \sum_{i=1}^P \left\| \Gamma_{y,i} (y(k+i|k) - r(k+i|k)) \right\| + \sum_{i=1}^M \left\| \Gamma_{u,i} \Delta u(k+i-1|k) \right\|$$

式中： $k+i|k$ 为 k 时刻对第 $k+i$ 的估计。

Γ_{yi} 、 Γ_{ui} 为权重举证。

$\Delta u(k)$ 为控制输入在 k 时刻的增量， $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ 。

考虑到紧急制动时输入、输出等存在的一些约束问题，需要列举可能存在的一些约束：

$$\begin{aligned} |\Delta T_i(k+i|k)| &\leq \Delta T_{\max} \\ |T_i(k+j|k)| &\leq T_{\max}, j=0,1,\dots,M+1 \\ 0 \leq \lambda_i(k+j|k) &\leq 1, j=0,1,\dots,P \end{aligned}$$

即为所要求解的问题。利用二次规划算法(Quadratic Programming, QP 算法)求解优化目标函数,得到控制输入增量的序列,将此序列的第一个元素与上一时刻控制输入相加,即为当前所需的控制输入,即汽车前后轴的制动力矩。在以后的每个采样时刻重复以上操作,刷新优化目标函数求解[10]。

5. 联合仿真

5.1. 可行性仿真

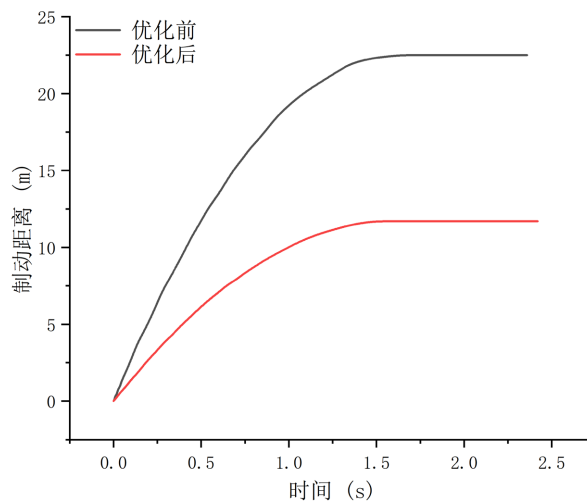


Figure 5. Braking distance curve

图 5. 制动距离曲线

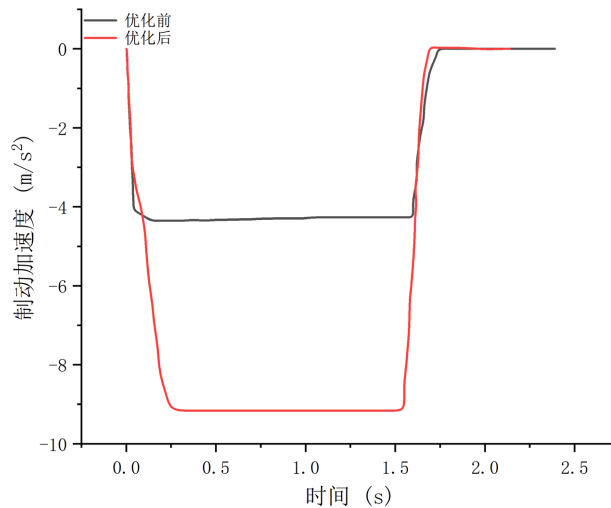


Figure 6. Braking acceleration curve

图 6. 制动加速度曲线

根据 GB7258-2017 中的乘用车制动距离和制动减速要求,并考虑国家乘用车制动安全检查标准,模

拟车辆的初始速度设置为 13.8 m/s。它在柏油路上以最大的制动力刹车。制动距离和制动减速度如图 5 和图 6 所示。

从上图可以看出,优化后的车辆在初始速度为 13.8 m/s 时的制动距离约为 11 m,在约 0.3 s 时的制动减速度达到 8.5 m/s^2 。优化前的车辆制动距离为 22.5 m,制动减速度仅为 4.2 m/s^2 ,此优化策略有效。

5.2. 仿真工况和参数设计

为了验证上述复合制动对能量回收率提升的效果,工况设定在路面附着系数为 0.8 的路面上。针对上述机电复合制动控制策略搭建 Simulink 模型与 CRUISE 整车模型联合仿真,车辆的基本参数见表 2。

Table 2. Basic parameters of the vehicle

表 2. 整车基本参数

| 参数名称 | 大小 |
|-------------------------------------|--------|
| 整车质量 m/kg | 1359.8 |
| 车轮转动惯量 $\text{J/kg}\cdot\text{m}^2$ | 0.82 |
| 车轮半径 R/m | 0.26 |
| 汽车中心到前轴距离/m | 1.016 |
| 汽车中心到后轴距离/m | 1.436 |
| 汽车中心高度 h/m | 0.54 |

5.3. 不同工况下模拟

验证所提出的机电复合制动控制策略可行性,将优化后的机电复合制动控制策略在 FTP、NEDC 循环工况下同优化前进行对比仿真,能量变化曲线,电池 SOC 变化曲线如图 7~10 所示。

从表 3 可以看出,在 FTP 工况下,用 MPC 进行优化对比优化前的数据,能量回收量明显增加了一倍左右,最终 SOC 值降低了 0.66%。

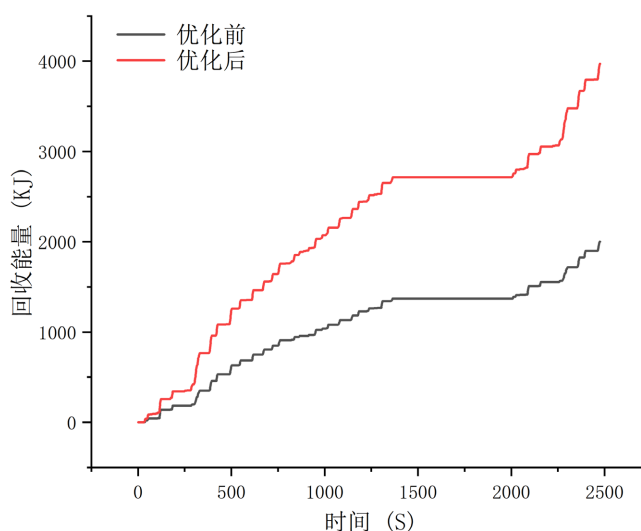


Figure 7. Energy curve of SOC recovery under FTP

图 7. FTP 下 SOC 回收的能量曲线

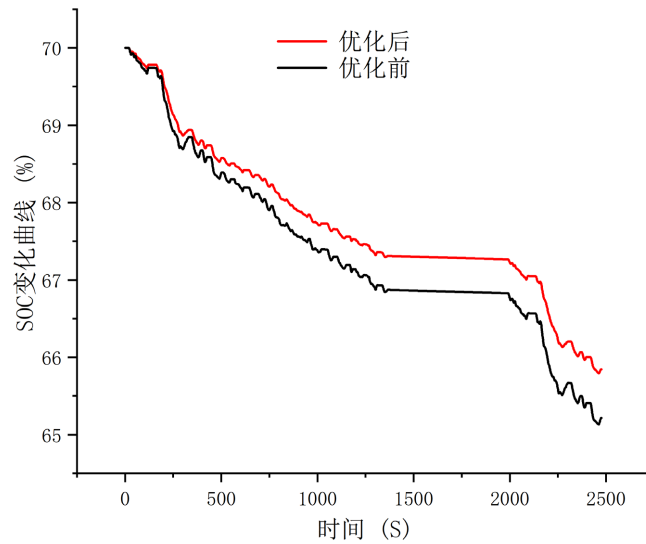


Figure 8. SOC change curve under FTP

图 8. FTP 下 SOC 变化曲线

Table 3. Simulation data under FTP working condition

表 3. FTP 工况下仿真数据

| FTP 工况下优化前后数据对比 | | |
|-----------------|-----------|--------|
| 状态 | SOC 能量回收量 | SOC 终值 |
| 优化前 | 2000.95 | 65.13 |
| 优化后 | 3970.80 | 65.79 |

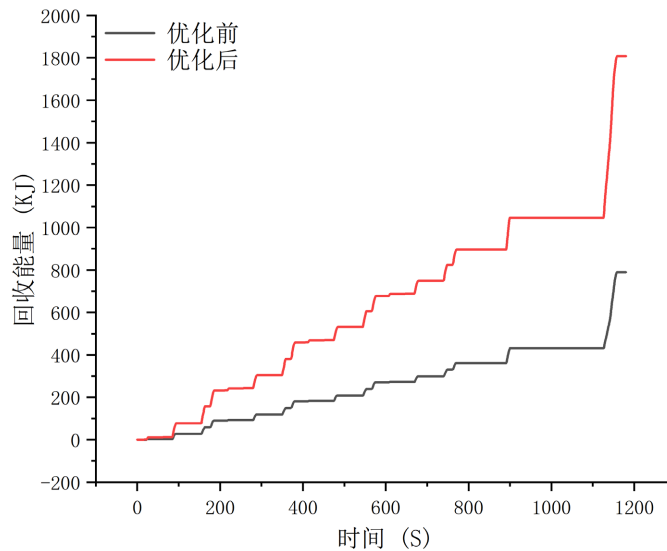


Figure 9. Energy curve of SOC recovery under NEDC

图 9. NEDC 下 SOC 回收的能量曲线

从表 4 可以看出，在 NEDC 工况下，用 MPC 进行优化对比优化前的数据，能量回收量明显增加了一倍左右，最终 SOC 值降低了 0.46%。

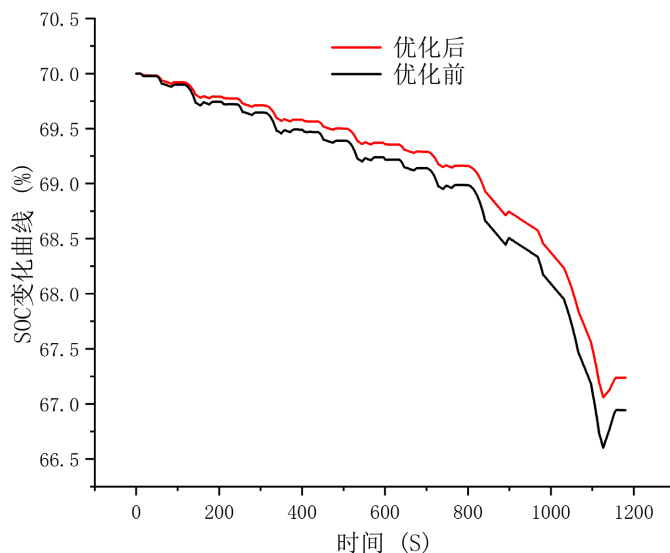


Figure 10. SOC variation curve under NEDC

图 10. NEDC 下 SOC 变化曲线

Table 4. Simulation data under NEDC working condition

表 4. NEDC 工况下仿真数据

| NEDC 工况下优化前后数据对比 | | |
|------------------|-----------|--------|
| 状态 | SOC 能量回收量 | SOC 终值 |
| 优化前 | 789.87 | 66.60 |
| 优化后 | 1808.04 | 67.06 |

6. 结论

本文采用路面识别器和模型预测算法设计了一种复合制动控制策略。该策略的目的是使汽车在纵向行驶开始紧急制动时，获得最佳的制动效果以及有效提高制动能量的回收。首先本文采用模糊控制理论设计路面识别系统，实时跟踪路面附着系数峰值，确定当前路面的最优滑移率，然后以前、后轴制动力矩为控制输入，以车轮滑移率为控制输出，根据再生制动系统与液压制动系统的响应特性及约束，利用模型预测控制(MPC)使车轮滑移率跟踪最佳滑移率，在保证汽车安全、稳定的同时，得到最佳的制动力矩。考虑到制动能量回收效率，来确定前轮中再生制动力矩与液压制动力矩的大小。通过在 MATLAB/Simulink 搭建纯电动汽车模型，对控制策略进行仿真分析，验证了紧急制动工况下，控制策略的有效性，为研究新能源汽车机电复合制动系统奠定了基础。

参考文献

- [1] 马建, 刘晓东, 陈轶嵩, 等. 中国新能源汽车产业与技术发展现状及对策[J]. 中国公路学报, 2018, 31(8): 1-19.
- [2] Li, W.B., Long, R.Y., Chen, H., et al. (2017) A Review of Factors Influencing Consumer Intentions to Adopt Battery Electric Vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **78**, 318-328. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.076>
- [3] 汪选要, 程义, 程煜. 低附着系数路面车道保持模型预测控制及汽车稳定性控制[J]. 中国机械工程, 2019, 30(9): 14-21.
- [4] Ruan, J., Walker, P.D., Watterson, P.A., et al. (2016) The Dynamic Performance and Economic Benefit of a Blended Braking System in a Multi-Speed Battery Electric Vehicle. *Applied Energy*, **183**, 1240-1258. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.057>

- [5] Bhandari, R., Patil, S. and Singh, R.K. (2012) Surface Prediction and Control Algorithms for Anti-Lock Brake System. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **21**, 181-195. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.09.004>
- [6] 彭晓燕. 汽车线控制动系统安全控制技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [7] 孔国利, 张璐璐. 双轮倒立摆机器人的模型预测控制策略[J]. 机械设计与制造, 2018(9): 265-268.
- [8] 刘志强, 汪浩磊, 陈建兵. 电动汽车机电复合回馈制动模拟试验台设计[J]. 机械设计, 2016, 33(11): 43-47.
- [9] Wang, X.Y., Cheng, Y. and Cheng, Y. (2019) Lane Keeping Model Prediction Control and Vehicle Stability Control on Low Adhesion Coefficient Roads. *China Mechanical Engineering*, **30**, 14-21.
- [10] Wang, Z., Fang, S.C. and Gao, D.Y. (2017) Global Extremal Conditions for Multi-Integer Quadratic Programming. *Journal of Industrial & Management Optimization*, **4**, 213-225. <https://doi.org/10.3934/jimo.2008.4.213>